

# Non-radial Oscillations of Magnetized Neutron Stars

著者	浅井 秀貴
号	70
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第2963号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/64236">http://hdl.handle.net/10097/64236</a>

# 論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	浅 井 秀 貴	提出年	平成 27 年
学位論文の 題 目	Non-radial Oscillations of Magnetized Neutron Stars (磁場を持つ中性子星の非動径振動)		

## 論文目次

- 1 Introduction
- 2 Non-radial oscillations of neutron stars
  - 2.1 normal modes of non-rotating and non-magnetic normal stars
  - 2.2 waves propagating in a solid crust
  - 2.3 normal modes of rotating stars
  - 2.4 normal modes of magnetized stars
  - 2.5 series expansions for the perturbations
  - 2.6 oscillation frequency spectra of neutron stars
- 3 Normal modes of uniformly rotating stars magnetized with purely toroidal magnetic fields
  - 3.1 method of solution
    - 3.1.1 equilibrium model
    - 3.1.2 perturbation equations
  - 3.2 numerical results
    - 3.2.1 g-, f-, and p-modes
    - 3.2.2 rotational modes
    - 3.2.3 magnetic modes
- 4 Normal magnetic modes of neutron stars magnetized with purely poloidal magnetic fields
  - 4.1 method of solution
    - 4.1.1 equilibrium model
    - 4.1.2 perturbation equations
  - 4.2 numerical results
    - 4.2.1 stable magnetic modes
    - 4.2.2 unstable magnetic modes
    - 4.2.3 discussion
- 5 Conclusion
- APPENDIX : A
- APPENDIX : B
- APPENDIX : C
- APPENDIX : D
- APPENDIX : E
- APPENDIX : F

# 論 文 要 旨

We investigate the properties of non-axisymmetric oscillations of uniformly rotating and magnetized stars with purely toroidal magnetic field and of non-rotating magnetized stars with purely poloidal magnetic field, where

we use polytropes as background models for the modal analyses.

For the oscillations of rotating stars magnetized with purely toroidal magnetic field, we consider the effects of stellar deformation due to the magnetic field. Since separation of variables is not possible for

magnetized or rotating stars, we employ series expansions of a finite length for the perturbations in terms of spherical harmonic functions.

Solving the oscillation equations as a boundary and eigenvalues problem, we obtain magnetically modified normal modes such as  $g$ -,  $f$ -,  $p$ -,  $r$ -, and inertial modes for magnetized stars having purely toroidal fields. In the lowest order, the deviation of the frequencies from those of non-magnetized stars is proportional to the square of the characteristic Alfvén frequency.

We also find the high-frequency modes such as  $f$ - and  $p$ -modes are strongly affected by the stellar deformation, although the low-frequency modes such as  $g$ -,  $r$ -, and inertial modes are hardly affected by the deformation.

For the stars magnetized with purely poloidal fields, we find two kinds of discrete magnetic modes, that is,

stable (oscillatory) magnetic modes and unstable (monotonically growing) magnetic modes.

For isentropic stellar models, the frequency and growth rate of the magnetic modes are exactly proportional

to the strength of magnetic field  $B_s$  measured at the stellar surface.

The frequency and growth rate are affected by buoyant force in the interior of the star, and unstable magnetic modes are stabilized by stable stratification.

## 論文審査の結果の要旨

中性子星は大質量星の超新星爆発の結果生まれる、質量が太陽質量程度で半径が10 km程度の非常にコンパクトな高密度天体である。標準的な中性子星は $10^{12}$  G程度の表面磁場を持っていると考えられているが、中には $10^{14}$  Gを超える表面磁場を持つ中性子星が存在することが知られている。このような強磁場を持つ中性子星はmagnetarとよばれる。Magnetarの数は少ないが、その中のいくつかはまれに巨大フレアーを起こし、それがX線や $\gamma$ 線で観測される。そのような巨大フレアーの光度曲線をフーリエ解析すると準周期的振動が複数同定され、その振動数は強磁場を持つ中性子星の固有振動を反映したものではないかと考えられている。浅井君の博士論文は、このような非常に強い磁場を持つ中性子星の固有振動を調べたものである。

浅井君は強磁場中性子星の固有振動を、基準モード解析(normal mode analysis)を数値的に行って調べた。線型基準モードの支配方程式は本来偏微分方程式であるが、中性子星は基本的に球対称な天体なので、振動モードの角度( $\theta, \phi$ )依存性は球面調和関数 $Y_l^m$ を用いて表され、特に自転や磁場が無視できるときは、一つの球面調和関数を使って変数分離することで、支配方程式を常微分方程式に書き直すことができる。中性子星の自転や磁場を考慮する場合には、振動モードを球面調和関数 $Y_l^m$ で展開することで、支配方程式を、展開係数を変数とする常微分方程式に書き直す。浅井君はこのようにして得られた高階常微分方程式を、振動数についての境界値固有値問題として数値的に解くことで、強磁場中性子星の固有振動の性質を調べた。

博士論文では、トロイダル磁場とポロイダル磁場の二つの平衡磁場の場合について、中性子星の非軸対称振動モードの解析を行っている。平衡磁場がトロイダル磁場の場合は、ローレンツ力はスカラー関数の勾配の形で書け、p-モード、f-モード、g-モード、慣性モード、そしてr-モードなど標準的な振動モードを計算することができる。磁場による中性子星の平衡形状の変形の効果なども考慮することで、標準的な振動モードの固有振動数が、トロイダル磁場によってどのようにずれるかを調べた。平衡形状の変形の効果は、p-モードやf-モードなどの高周波の振動モードには強く現れるが、g-モード、慣性モード、そしてr-モードなどの低周波の振動モードでは弱いことを示した。振動数が磁場の強さに比例するような磁場モードを見つけることはできなかった。平衡磁場がポロイダル磁場の場合、振動数が磁場の強さに比例するような磁場モードのみが求められ、標準的な振動モードは求められなかった。安定な磁場モードと不安定な磁場モードが存在し、不安定磁場モードの成長率は、対称軸周りの波数 $m$ が大きくなるほど高くなることを示した。また、数値計算における動径方向のメッシュの数を減らすことで標準的なp-モードやf-モードを求めることも可能であるが、それが与えられた微分方程式の真性の解であるかは議論の余地があるところであると示唆した。

磁場を持つ中性子星の振動の研究では、多くの場合、偏微分方程式である支配方程式を満たす振動の時間発展を数値的に追いかけるという手法がとられる。したがって今回の浅井君の博士論文で行ったように、基準モード解析によって磁場を持つ中性子星の固有振動モードを調べるという研究は、独自の意味を持つ。また、上で述べた博士論文の成果は、すでに二つの論文となって出版されている。このような研究を遂行するためには、流体力学や電磁流体力学の十全な理解だけではなく、中性子星という特異な天体を支配する物理の理解も必須で、それに加えて、星の振動を数値的に取り扱うための数学的知識や数値計算の技術も必要となる。出版された学術論文や博士論文から明らかなように、浅井君は自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識とを持っている。浅井秀貴提出の博士論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認めることができるものである。